

EL TAPANCO EN VIVIENDAS VERNÁCULAS DE QUERÉTARO, MÉXICO. USO Y EFICIENCIA HIGROTÉRMICA

TAPANCO IN VERNACULAR HOUSES IN QUERÉTARO, MEXICO. USE AND HYGROTHERMAL EFFICIENCY

O "TAPANCO" NAS MORADIAS VERNACULARES DE QUERÉTARO, MÉXICO. USO E EFICIÊNCIA HIGROTÉRMICA.

Martín Hernández-Chavela

Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Málaga, Málaga, España
<https://orcid.org/0000-0002-6525-3610>
martin.hc@queretaro.tecnm.mx

Flavio Roberto Ceja-Soto

Carolina Performaces fabrics
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), Santiago de Querétaro, México
<https://orcid.org/0009-0002-8570-1270>
flace5@hotmail.com

Ángel Marroquín de Jesús

División de Química Industrial y Energías Renovables
Universidad Tecnológica de San Juan del Río, San Juan del Río, México
<https://orcid.org/0000-0001-7425-0625>
amarroquind@utsjr.edu.mx



RESUMEN

Hoy día son evidentes las consecuencias climáticas provocadas por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que encaminan a alcanzar 2.7 °C de calentamiento global hacia 2100. La dependencia energética de las edificaciones es una de las causas principales, pues demandaron solo para calefacción el 50% del consumo de energía global en 2021, siendo necesario implementar sistemas bioclimáticos pasivos de climatización. Este trabajo documenta la utilización en viviendas vernáculas de Querétaro, México, de un eficiente sistema pasivo tipo ático, denominado "tapanco", consistente en una cámara de aire inerte que funciona como amortiguador térmico. Se evaluó un caso aplicando metodologías de medición con termo-higrómetros, complementando con termografía y simulación termo-eólica. Los hallazgos de índices higrométricos adecuados, propiciados por el sistema, lo convierten en alternativa relevante de solución pasiva en el diseño arquitectónico bioclimático futuro, para abatir los índices energéticos y climáticos adversos.

Palabras clave

arquitectura vernácula, arquitectura bioclimática, calentamiento global, eficiencia energética.

ABSTRACT

Today, the climatic consequences caused by greenhouse gas (GHG) emissions are evident and are on track to see global warming of 2.7 °C by the end of the century. The energy dependence of buildings is one of the main causes, since they required 50% of global energy consumption in 2021 just for heating, making it necessary to implement passive bioclimatic air conditioning systems. This work documents the use in vernacular dwellings in Queretaro, Mexico, of an efficient attic-type passive system, called "tapanco", consisting of an inert air chamber that functions as a thermal buffer. A case was evaluated by applying measurement methodologies with thermo-hygrometers, complemented with thermography and thermo-wind simulation. The findings of adequate hygrometric indices, fostered by the system, make it a relevant alternative for a passive solution in future bioclimatic architectural design, to reduce adverse energy and climatic indices.

Keywords

vernacular architecture, bioclimatic architecture, global warming, energy efficiency.

RESUMO

Hoje, as consequências climáticas das emissões de gases de efeito estufa (GEE) são evidentes e estamos a caminho de atingir 2,7°C de aquecimento global até 2100. A dependência energética das edificações é uma das principais causas, pois elas representaram 50% do consumo global de energia apenas para aquecimento em 2021, tornando-se necessário implementar sistemas passivos bioclimáticos de climatização. Este trabalho documenta a utilização de um eficiente sistema passivo tipo sótão, chamado "tapanco", em moradias tradicionais de Querétaro, México. O sistema consiste em uma câmara de ar inerte que atua como amortecedor térmico. Foi avaliado um caso utilizando metodologias de medição com termo-higrômetros, complementadas por termografia e simulação termo-eólica. Os resultados dos índices higrométricos adequados proporcionados pelo sistema fazem dele uma solução passiva alternativa relevante como solução passiva no futuro projeto arquitetônico bioclimático, visando reduzir os índices energéticos e climáticos adversos.

Palavras-chave

arquitetura tradicional, arquitetura bioclimática, aquecimento global, eficiência energética.

INTRODUCCIÓN

Los graves efectos climáticos actuales pueden aminorarse significativamente abatiendo las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (en adelante, GEI), las que, debido a la dependencia energética humana, son causantes del calentamiento global, el cual debiera mantenerse en 1.5 °C para evitar la debacle climática hacia el año 2100 (United Nations Environment Programme, 2021).

En su ciclo de vida, muchas edificaciones han sido altamente demandantes de energía y poco funcionales térmicamente. Esto se debe principalmente a las pésimas propiedades térmicas de sus materiales y por un diseño arquitectónico y aislamiento inadecuados. La causa de ello es que la construcción está normalizada globalmente, sin considerar los climas locales ni las implicaciones energéticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Lo anterior conlleva a que la climatización electro-mecánica sea la solución más buscada por el sector residencial, representando el mayor consumo energético (Aguilera et al., 2018). Un dato a destacar es que, en 2021, solo la calefacción representó el 50% del consumo de energía global (Global Crisis Response Group, 2022). En la actualidad, es precisamente la eficiencia energética de los edificios el principal problema a resolver en este sector, debido a que la climatización interior es el factor que representa el mayor consumo de energía en el mundo. De ahí que plantear una propuesta de solución mediante el uso de un sistema bioclimático pasivo es el tema central de este estudio.

Si queremos llegar a una meta en la que la eficiencia energética sea el principio fundamental que rijan la construcción de edificaciones residenciales, esta debería llevarse a cabo mediante formas de construir que eviten la climatización mecánica. Esto se puede lograr por medio de diseños mejorados que consideren el clima local. Del mismo modo, es necesario proponer el uso de materiales de baja energía embebida, al igual que incluir estrategias bioclimáticas pasivas y soluciones basadas en la naturaleza que permitan adaptar los edificios al clima futuro. La implementación de estas propuestas tiene por objetivo producir la disminución de los requerimientos energéticos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022), a la vez que permita el confort y garantice el bienestar humano.

Por otro lado, es evidente que los paradigmas arquitectónicos actuales se encuentran obsoletos y, por lo mismo, deben ser cuestionados a fin de hacer un giro hacia otro tipo de soluciones ya probadas, como son las arquitecturas vernáculas. Estas, basadas en el conocimiento ancestral producto de siglos de observación y experimentación, históricamente han demostrado eficiencia en su adaptabilidad física, a través de la utilización de materiales naturales y estrategias bioclimáticas, lo cual representa una poderosa alternativa para la eficiencia energética (en adelante, EE).

Las viviendas vernáculas utilizan estrategias pasivas para garantizar el confort higrotérmico con casi nula demanda energética, pues no recurren a sistemas electro-mecánicos, aun cuando carecen de electricidad. Se construyen bajo escasez y meticulosa gestión de recursos, representando un patrimonio ambiental sostenible al servicio de la edificación actual. Los países en vías de desarrollo conservan muestras de estos hábitats que pueden representar sistemas modelo de adaptabilidad (Rapoport, 2003).

En Querétaro, se han documentado construcciones vernáculas en diversas regiones climáticas (Figura 1), las que utilizan el sistema bioclimático pasivo denominado "tapanco", que consiste en una cámara de aire inerte que funciona como amortiguador termo-acústico, propiciando condiciones higrotérmicas interiores adecuadas, en climas diversos.

De esta manera, el objetivo de investigación de este trabajo consiste en documentar el uso en las viviendas vernáculas de Querétaro del sistema pasivo bioclimático denominado tapanco y evaluar su eficiencia higrotérmica mediante el análisis de un caso ubicado en una zona climática templada extrema, utilizando para ello metodologías de medición de parámetros internos-externos. Se realizaron primeramente mediciones con higrómetros; en segundo término se llevó a cabo un análisis con fotografías termográficas y finalmente se desarrolló un modelaje y simulación termo-eólica. Se parte de la hipótesis de asociar el confort interno con la regulación térmica y humedad relativa, extrapolando el desempeño térmico a condiciones extremas mediante simulación en función del diseño y los materiales.



Figura 1. Vivienda vernácula rural y urbana de Querétaro. Fuente: Elaboración de los autores.

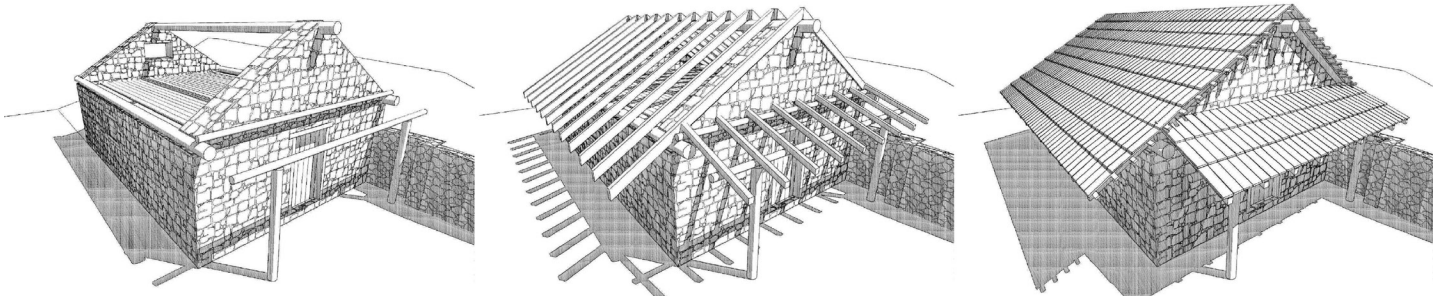


Figura 2. Estructuración tapanco de madera y tejamanil. Fuente: Elaboración de los autores.

Los resultados permiten verificar la idoneidad del tapanco para producir confort higrométrico interior, considerándolo como alternativa de diseño para modelos arquitectónicos que sean térmica y energéticamente eficientes. Una vez trasladado científicamente este conocimiento a los requerimientos arquitectónicos actuales, resultará muy útil para enfrentar los climas futuros.

No es objeto del presente estudio precisar los índices de disminución del gasto energético con el uso del sistema. Sin embargo, podemos afirmar que, de acuerdo con los trabajos de Martín-Consuegra et al. (2014) y Suárez et al. (2018), que tanto la implementación de estrategias bioclimáticas pasivas, como los desvanes inhabitables o “techos frescos ventilados”, principalmente en cubiertas inclinadas, inciden significativamente en la mejora de la EE.

ANTECEDENTES

El tapanco vernáculo en Querétaro.

El ático es una estrategia bioclimática pasiva utilizada por siglos, la cual consiste en una cámara de aislamiento térmico. En la arquitectura vernácula queretana se ha utilizado un elemento similar, el «tapanco», cuya denominación proviene del náhuatl «tapantli» (techo) y el sufijo “co” (en), y que es un tipo de desván usado para almacenar objetos y secar semillas o plantas, que consiste en la división en altura de una habitación mediante un tablado horizontal, conformando un entrepiso que no tiene función habitable, a diferencia del ático (Figura 2).

Este entrepiso funciona como amortiguador termo-acústico al optimizar los valores de transmitancia térmica del techo, “retardando” el paso de la temperatura exterior, con tiempo suficiente para mantener el interior estable hasta el reinicio del ciclo térmico, aminorando también los ruidos por lluvia o granizo. Resulta útil en clima templado o cálido, utilizándose una ventila en el tímpano para remover el aire inerte. En Querétaro se han documentado quince sitios con evidencias de este elemento, en regiones climáticas diversas, destacando la localidad de clima templado extremo, el Ejido “La Barranca” en el municipio de Pinal de

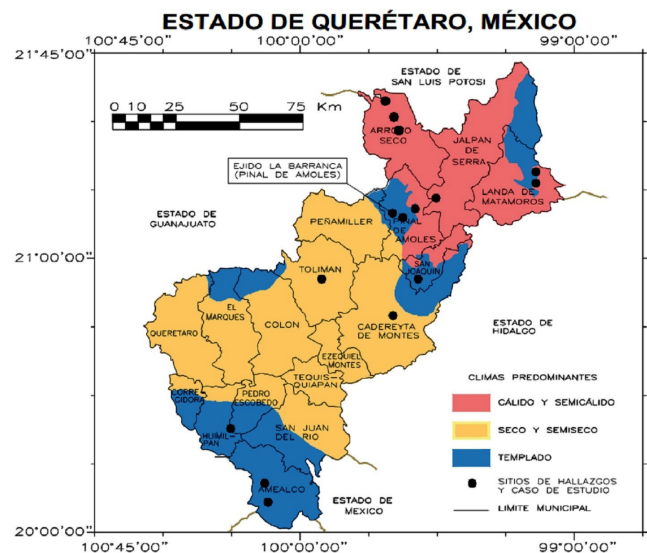


Figura 3. División política y climática de Querétaro. Ubicación de sitios con hallazgos y caso de estudio. Fuente: Elaboración de los autores con datos de INEGI, 2017.

Amoles, en donde se realizaron las mediciones (Figura 3).

La conformación arquitectónica del tapanco vernáculo rural cubre la cruja totalmente, basándose en una estructura tipo armadura y puntales, elaborada con pequeñas vigas, barros y morillos, y está recubierta con pequeñas tejas de madera denominadas “tejamanil”, las cuales son de origen local y están elaboradas manualmente (Figura 4).

En las viviendas tradicionales de zonas más urbanas existen grandes tapancos (Figura 5) que utilizan también estructura tipo armadura de mayor envergadura, recubierta con tejado de barro, las que descansan sobre muros de calicanto de una vara de espesor (80 cm).

Estas construcciones vernáculas presentan otras estrategias pasivas que coadyuvan para su eficiencia térmica, las que no son tema de análisis del presente estudio, pero es interesante mencionar, tales como: la sabia combinación de materiales locales con buena inercia térmica; la utilización de “muros térmicos” semienterrados; la orientación



Figura 4. Tapancos en áreas rurales de Querétaro. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 5. Tapancos en áreas urbanas de Querétaro. Fuente: Elaboración de los autores.

franca oriente-poniente de las crujías; el aprovechamiento de la vegetación endémica para aminorar asoleamiento y humidificar, etc.

Debido a la descomposición de la vivienda vernácula para dar paso a nuevas formas de habitar con nociones actuales de "evolución" (Juárez, 2022), en Querétaro el tapanco ha caído en desuso casi totalmente, derruyéndose incluso lo existente, debido a la ignorancia sobre sus beneficios higrotérmicos y al dar entrada a los materiales industriales, siendo inaplazable la documentación sobre esta estrategia.

ESTADO DEL ARTE

La grave problemática ambiental actual ha obligado a establecer políticas de EE en muchos países, relativas a mediciones y certificaciones energéticas como herramientas para minimizar los consumos energéticos y las emisiones de GEI (Fernandez et al., 2020). Esta políticas han establecido requisitos mínimos para envolventes y sistemas mecánicos para confort térmico. Existen muchas normas energéticas, sin embargo, estas no son aplicadas en todos los países, por lo que muchas construcciones las toman como base, de manera "voluntaria". Más del 80% de las iniciativas planteadas a nivel global consisten en métodos centrados solamente en la relación demanda-consumo y no en la EE (Reus-Netto et al., 2019).

Disminuir el consumo energético sin afectar el confort requiere la implementación de sistemas arquitectónicos

bioclimáticos, principalmente en edificios residenciales (Manzano et al., 2015, citado en Fernandez et al., 2020), los cuales deben ser evaluados y monitoreados higrotérmicamente. La Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas difunde principios de arquitectura bioclimática, eficiencia energética y uso de materiales de bajo impacto para lograr estas metas.

Existen trabajos relacionados con evaluación energética, requerimientos de aislamiento, implementación de estrategias pasivas y su relevancia en la EE, como los desarrollados por Aguilera et al. (2018), Mercado et al. (2018), Reus-Netto et al. (2019) y Fernandez et al. (2020). Especialmente hacemos referencia a estudios de Martín-Consuegra et al. (2014), Suárez et al. (2018) y Calderon (2019), relativos al análisis de la eficiencia térmica y energética de cámaras de aire en techos.

Respecto de la sostenibilidad, funcionalidad térmica y uso de estrategias pasivas en la vivienda vernácula, existen estudios como los de Herrera y Medina (2018), Mandrini (2022) y Juárez (2022). También los trabajos de Mercado et al. (2018), Ganem-Karlen (2018) y Alamino y Kuchen (2021) refieren sobre la importancia de las herramientas de simulación termo-energética, la termografía infrarroja y otras, como instrumentos para la evaluación higrotérmica. En Querétaro, prácticamente no se han desarrollado estudios técnico-arquitectónicos de vivienda vernácula bajo metodologías científicas, sino que han desarrollado mayormente investigaciones serias con enfoque

antropológico, las que ayudan a comprender el fenómeno de los entornos vernaculares.

MARCO TEÓRICO

VIVIENDA VERNÁCULA, SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

La arquitectura vernácula, cuyo comportamiento térmico se logra sin recurrir a sistemas electro-mecánicos y casi nula demanda energética, aporta en lo ambiental, lo económico y la calidad de vida, acorde con una sostenibilidad integral (Mandrini, 2022). Esta manera de edificar nace desde un conocimiento ancestral y cúmulo de experiencias de adaptabilidad climática, con referentes empíricos sostenibles como: conservación del conocimiento; uso de materiales locales; participación comunitaria; diversidad de soluciones (Lárraga et al., 2014). Surge en los pueblos autóctonos como respuesta a sus necesidades de habitar aprovechando su entorno y clima local, logrando autosuficiencia y confort. Los recursos y tecnologías limitados le permitieron lograr soluciones eficientes, armonizando el vínculo trabajo-vida familiar en interacción con el medio (Juárez, 2022).

Estos entornos vernáculos son pequeños hábitats racionalmente ecológicos y agrícolas, casi autosuficientes en la producción, manejo y consumo de recursos, que contribuyen a la identidad y valores socioculturales comunitarios, desempeñando así un importante papel en la economía, sociedad y manejo ambiental (Herrera & Medina, 2018). Las edificaciones que los conforman son energéticamente eficientes en todo su ciclo de vida, con casi nula demanda en la extracción, producción y traslado de materiales locales, naturales y con excelentes propiedades térmicas. En su demolición, estas construcciones se reintegran totalmente al medio natural o se reciclan. Además, utilizan estrategias bioclimáticas que no requieren electricidad para climatizar ni para iluminar y cuentan con pocos equipos eléctricos.

CONFORT, ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS PASIVAS Y EVALUACIÓN HIGROTÉRMICA

El confort es condición fundamental del hábitat y la sostenibilidad arquitectónica, ya que responde a la necesidad de cobijo. Incorporar soluciones constructivas sostenibles propicia el confort térmico interior con pocas implicaciones energéticas, siendo pertinente analizar modos de vida tradicionales que busquen soluciones bioclimáticas (Calderon, 2019).

El confort térmico no solo depende de parámetros ambientales, sino que también de otros elementos del entorno y de la percepción del sujeto, además de aspectos socioculturales (Mandrini, 2022). El comportamiento de los usuarios, al interactuar con los sistemas electro-mecánicos,

impacta en el rendimiento de los edificios, afectando el uso de la energía (Mercado et al., 2018). La sensación física de los sujetos influye en su bienestar, su eficiencia y su confort. Con variación continua del ambiente, ellos toman acciones conscientes o inconscientes para recuperar el equilibrio térmico y estar confortables (Rincón-Martínez et al., 2022), acudiendo a sistemas mecánicos que implican altos consumos energéticos, variables en función del clima y la envolvente (Reus-Netto et al., 2019).

Las estrategias pasivas incorporadas al diseño arquitectónico (en adelante, EPDA) contribuyen a la eficiencia energética y adecuan el edificio a las condiciones ambientales, mejorando el confort higrotérmico y reduciendo la demanda energética. La ponderación de dichas estrategias depende del clima local, pudiendo recurrir a diversas soluciones, tales como: el aislamiento térmico de techos, muros y pisos; colores externos; sombreado y proporción de ventanas; sistemas solares pasivos; alturas y nivel de hermeticidad entre otras. Estas se implementan para reducir la demanda energética, existiendo estudios que lo demuestran (Aguilera et al., 2018; Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017, p. 2; Martín-Consuegra et al., 2014; Mercado et al., 2018; citados en Fernandez et al., 2020).

Las medidas para EE en edificios incluyen: normativa, monitoreo y evaluación, considerando nuevos edificios, edificios energéticamente eficientes y edificios existentes (Schneider, 2015, citado en Ganem-Karlen, 2018). Asimismo, requieren técnicas confiables y rápidas de diagnóstico. Antes de edificar, es recomendable realizar una simulación térmica que emule las condiciones de confort, de acuerdo con materiales y clima, teniendo en cuenta, para la humedad relativa (HR), la siguiente relación para climas no extremos: a temperaturas altas, humedades relativas bajas y viceversa, (Ceja, 2012).

En la arquitectura vernácula, las formas se dan en respuesta al efecto combinado entre la temperatura, la humedad y el aire (Atmaca & Gedik, 2019; Bassoud et al., 2021; Chang et al., 2021; Manavvi & Rajasekar, 2020; 2021; Yan et al., 2020; Zhang et al., 2018; citados en Rincón-Martínez, 2022). La geometría también está condicionada por los materiales y la necesidad de implementar estrategias bioclimáticas pasivas para lograr confort, como se observará en el caso analizado.

METODOLOGÍA

Debido a las pocas evidencias existentes, el caso se seleccionó porque se ubica en una zona de clima templado extremo y por la conservación casi íntegra de materiales, diseño y tapanco. Se incluyen tres tipos de mediciones analíticas: inspección termográfica; medición de parámetros internos-externos utilizando termo-higrómetros; simulación térmica y eólica, con lo cual se busca la complementariedad y realización de una comparativa para obtener resultados más fidedignos.

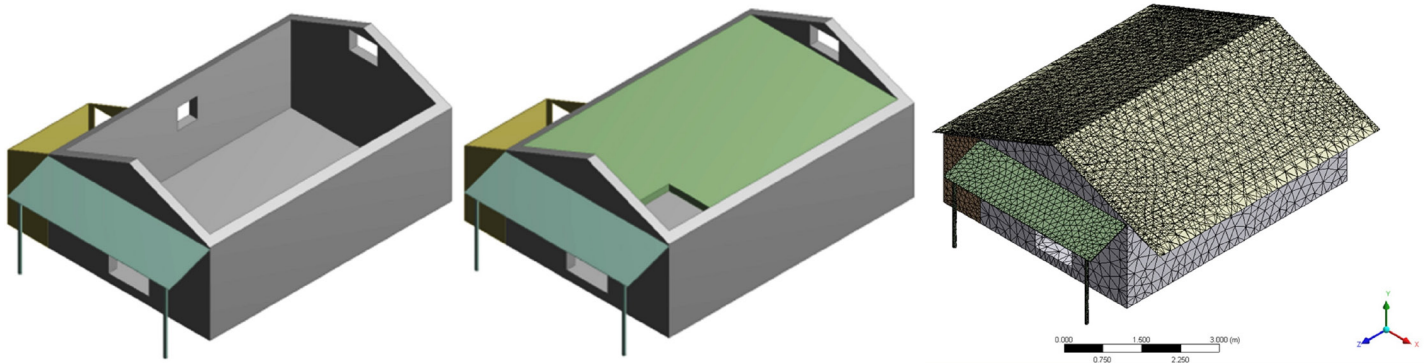


Figura 6. Modelo y mallado para ANSYS. Fuente: Elaboración de los autores.

INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

Se elaboró el mapeo exterior mediante una inspección termográfica, a fin de diferenciar el comportamiento cualitativo de los materiales y contrastarlos con la simulación, a fin de observar variaciones térmicas superficiales e identificar defectos causantes de ellas, como por ejemplo: fallos estructurales, humedades, falta de aislamiento y puentes térmicos. Se tomaron imágenes a distancia de 4 a 5 m, en fecha 5 de noviembre de 2011, alrededor de las 12:00 horas, empleando una cámara *ThermaCAM E45* de *Flir Systems* y el software *QuickReport* de la misma firma. Para desarrollar una termografía cuantitativa que arrojará datos más fidedignos, se introdujo un valor de emisividad de 0.85, que ronda la media presentada por los materiales típicamente empleados en construcción.

MEDICIONES CON TERMO-HIGRÓMETROS

Se realizaron mediciones internas-externas de temperatura y humedad relativa (HR), utilizando termo-higrómetros marca *Thermotracker*, con monitoreo continuo *in situ* durante tres meses, de julio a septiembre, reportando datos cada quince minutos para obtener medias de comportamiento diario. Los sensores internos se instalaron en las siguientes ubicaciones: uno en la media del espacio habitable, entre tapanco y piso, alejado de la ventana; y el otro, en la media espacial del tapanco, entre tablado y techo. Se colocó un sensor externo de referencia a media altura entre el alerón (parte saliente del techo) y el piso, para proteger el dispositivo de la intemperie y la radiación solar directa. Se registraron datos del ciclo trimestral y se interpretaron con el software *Thermotracker Pro*.

SIMULACIONES TERMO-EÓLICAS

Se desarrolló la simulación mediante la técnica de elemento finito con el programa *ANSYS*, para validar la información termográfica obtenida. Se elaboró el modelo en *Solid Works*, considerando los elementos constitutivos: materiales, tapanco, pórtico y ventana. Dicho modelo

se exportó a *Design Geometría* realizando el mallado del volumen de control para el análisis *ANSYS* (figura 6).

Los datos de conductividad térmica introducidos al programa *ANSYS*, correspondientes a los materiales, fueron: 0.28 W/m °C para madera, 0.72 W/m °C para piedra y 60.5 W/m °C para lámina de acero. Los valores de elemento finito se traspolaron a situaciones extremas, con temperatura invernal de 5 °C, veraniega de 50°C y radiación solar de 1,050 W/m², arrojada por la estación meteorológica correspondiente al área de estudio, en fecha y hora elegidas.

Uno de los factores para que exista transferencia calorífica es la convección, la que depende de la velocidad del aire, por lo cual se realizó una simulación eólica en *ANSYS*. Partiendo del modelo térmico, con una mallado CFD, se introdujo una velocidad de 5.8 m/s, que fue la media encontrada.

Resulta relevante señalar, por otro lado, que los usuarios manifestaron enfáticamente que la vivienda es fresca en verano y, principalmente cálida en los inviernos extremos, no requiriendo implementos para confort interior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS HIGROTÉRMICO DE CASO DE ESTUDIO: EJIDO LA BARRANCA, MUNICIPIO DE PINAL DE AMOLES

Las coordenadas geográficas del Ejido La Barranca son 21° 07' 36.2" N, 99° 41' 08.3" W. Tiene un clima templado subhúmedo con lluvias veraniegas; humedades altas y temperaturas muy bajas (14°C promedio), incluso bajo cero al rondar los 3,000 msnm, siendo una de las localidades más altas del país.

Sus construcciones combinan sabiamente diseño y materiales endémicos, madera y piedra, juntada con arcilla en muros de 55 cm de espesor que soportan la techumbre de armadura a "dos aguas" y el tablado a baja altura (1.85 m). Se conforma así el tapanco de forma triangular con



Figura 7. Crujía evaluada. Exterior e interior habitable y tapanco. Fuente: Elaboración de los autores.

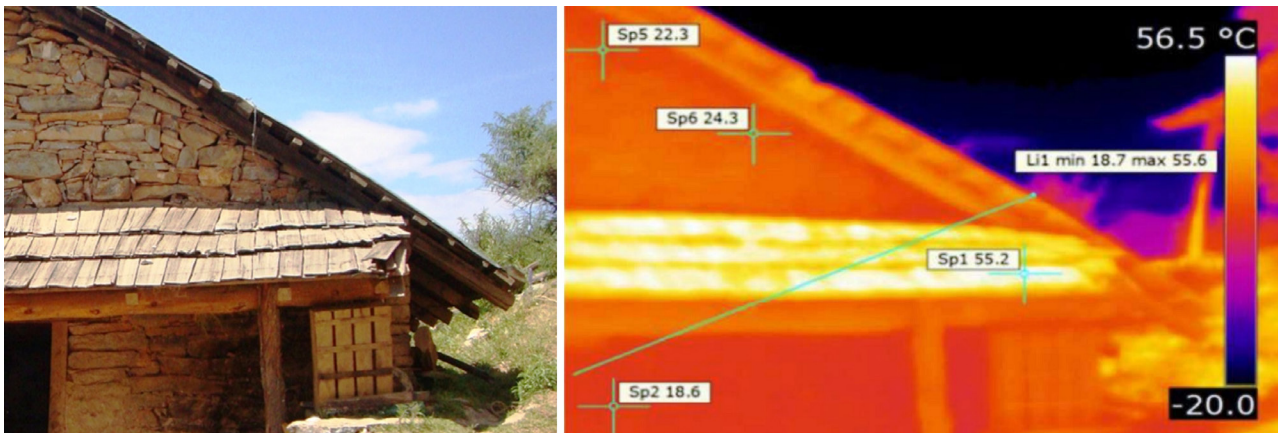


Figura 8. Mapa térmico parte frontal de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

pendiente aproximada del 60%, necesaria para desalojar lluvia y agua-nieve. El techo cubierto originalmente con “tejamanil”, por restricciones forestales y con más de 75 años de vida útil, se ha recubierto con lámina galvanizada, sin que afecte su termicidad. La crujía es multifuncional con dimensiones de 5x7 m (Figura 7).

INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

La figura 8 muestra que el mapa térmico frontal; el punto Sp1, que es el techo del pórtico, registra el valor más alto con 55.2 °C. El tímpano de piedra, correspondiente al punto Sp5, registra 22.3 °C. Por su parte, el punto Sp2, ubicado bajo el pórtico, es el valor más bajo con 18.6 °C. Esto refleja que las condiciones térmicas son adecuadas para ese espacio, el que actúa como amortiguador térmico.

En la figura 9, la techumbre del pórtico, es decir, punto Sp2, presenta 53.6°C, que corresponde al valor más alto. Por otro lado, el valor más bajo es el piso, correspondiente al punto Sp8, con 14.3°C. Finalmente, el punto Sp5, que es la banca de madera expuesta al sol, presenta 41.5°C.

En la figura 10a y figura 10b, se observa el techo exterior. En esta, la cumbrera o punto Sp1 presenta 51.6°C, que es el valor más alto. En el punto Sp4, que corresponde a la estructura de madera, se registran 27.5 °C. En el caso

del muro de piedra sombreado, que es el punto Sp5, se registra una temperatura de 12.7 °C, la cual es el valor más bajo, con lo que se comprueba la eficiencia térmica de los alerones. Lo descrito anteriormente se hace más notorio en la figura 10c que muestra la diferencia térmica entre la parte soleada del tímpano y la sombreada por el alerón.

La figura 11 corresponde al techo interior visto desde el tapanco. La temperatura más alta de 40.8°C corresponde a un hueco (puente térmico). Los largueros, Sp2, registran 27.4°C; una viga, Sp5, tiene 22.9°C; el muro de piedra registra la mínima de 14.7°C.

MEDICIÓN DE PARÁMETROS INTERNOS CON HIGRÓMETROS

En la figura 12 se aprecia en color negro el comportamiento interno de la crujía, que mantuvo una temperatura entre 13 y 16°C. Por su parte, en gris, se observa el comportamiento externo que presentó entre 8 y 24°C. La línea punteada indica el comportamiento del tapanco con temperaturas máximas de 30°C y mínimas de 7.5°C, demostrando que funciona como isla de calor al mantener temperaturas estables debajo de este elemento, es decir, como amortiguador térmico. El interior presentó entre 45 y

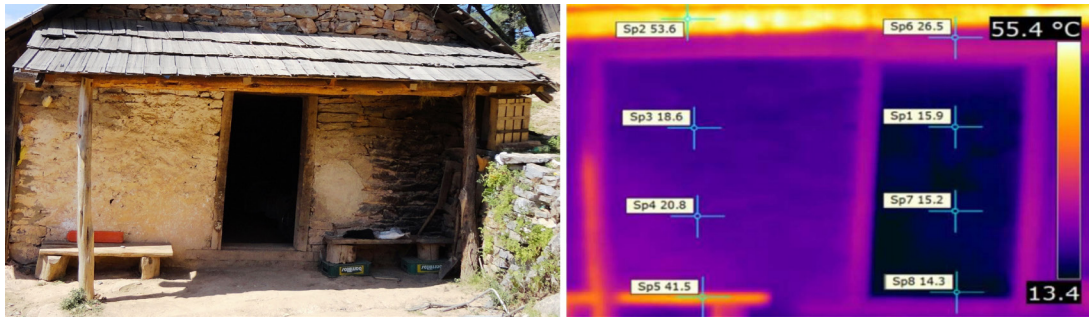


Figura 9. Mapa térmico pórtico de acceso de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

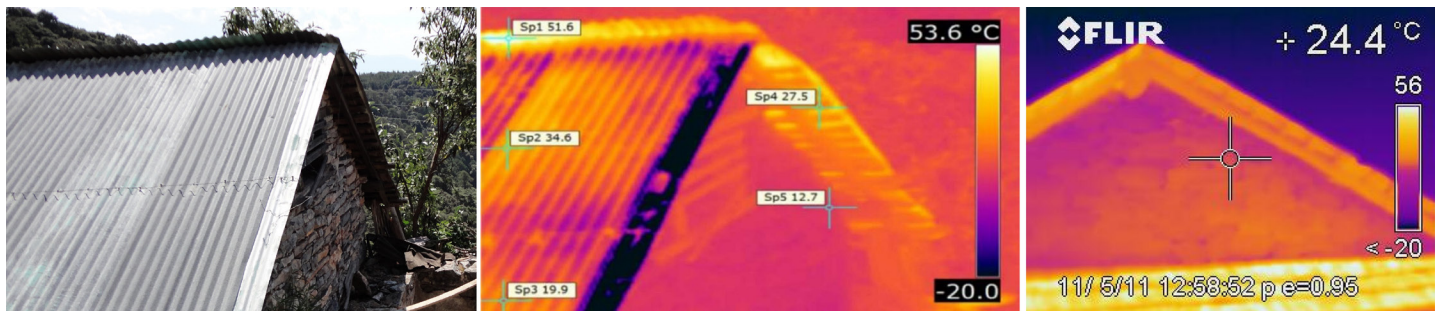


Figura 10. Mapa térmico techo exterior de la vivienda y frontón. Fuente: Elaboración de los autores.

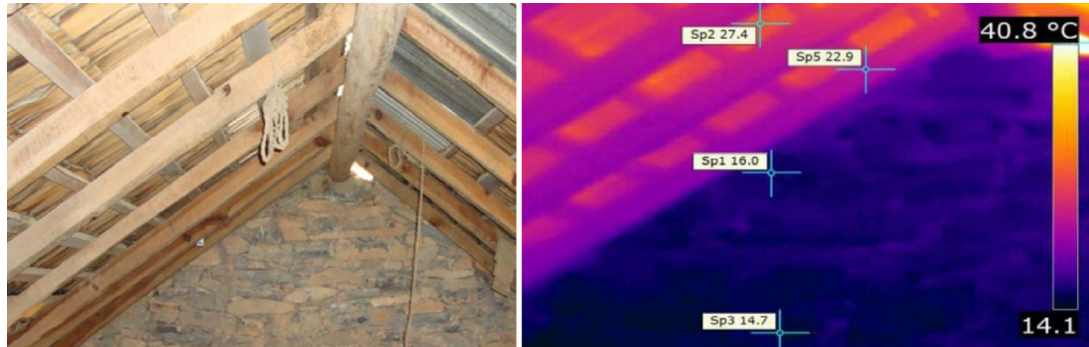


Figura 11. Mapa térmico interior del tapanco. Fuente: Elaboración de los autores.

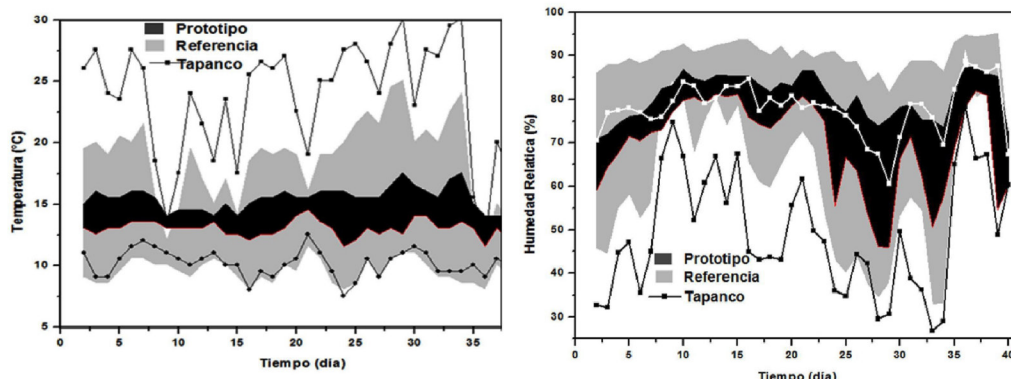


Figura 12. Comportamiento higrotérmico interior. Fuente: Elaboración de los autores.

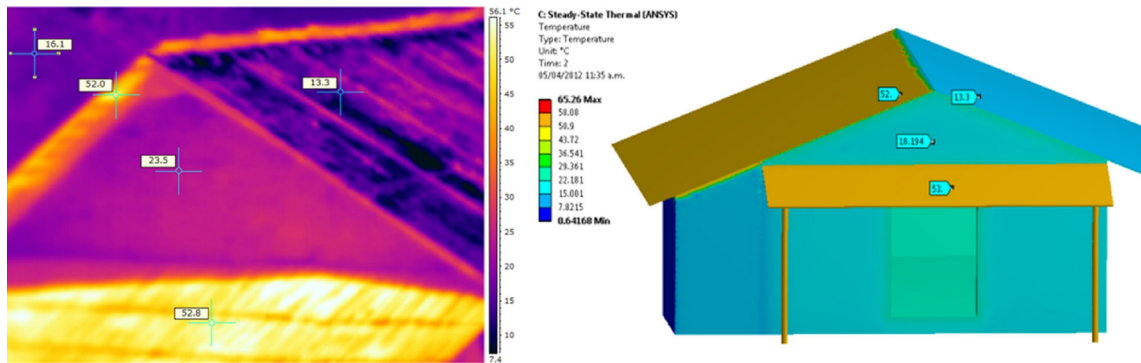


Figura 13. Comparativa termografía y simulación ANSYS exterior. Fuente: Elaboración de los autores.

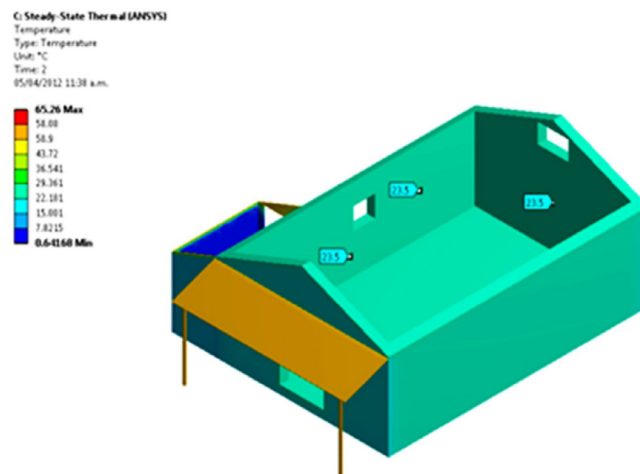


Figura 14. Simulación comportamiento térmico interior. Fuente: Elaboración de los autores.

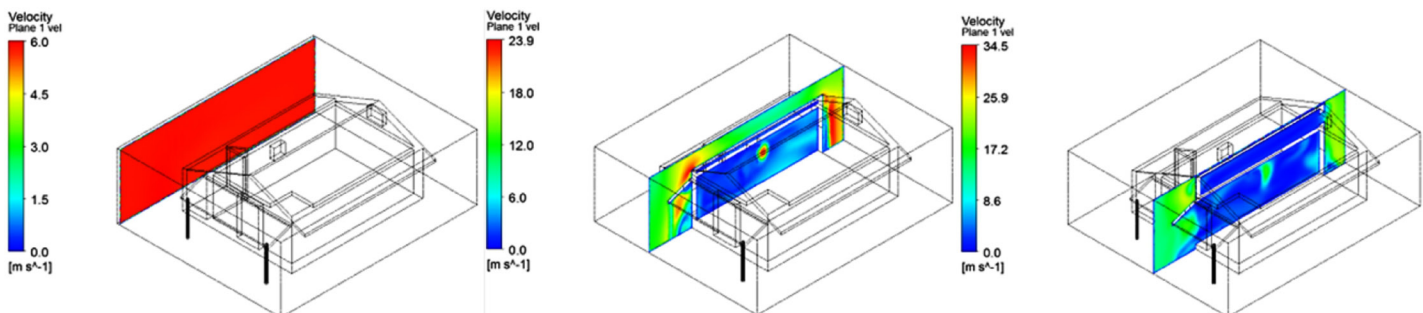


Figura 15. Simulación comportamiento velocidad del aire. Fuente: Elaboración de los autores.

85% de HR, mientras que, al mismo tiempo, el dispositivo externo registró entre 30 y 95% de HR. De acuerdo con estos datos, se observa que el tapanco muestra un dato esperado: HR baja al concentrar calor, pues, con excepción de climas tropicales, estas variables juegan un rol inversamente proporcional.

SIMULACIÓN TÉRMICA Y EÓLICA DE ELEMENTO FINITO.

Hecha la traspolación a situaciones extremas, los resultados en ANSYS muestran concordancia con los de la termografía

(figura 13), pues ambas técnicas presentan temperaturas exteriores similares: sobre 52°C en las cubiertas soleadas, 13°C en las sombreadas y de 18-23°C en el tímpano sombreado.

Las mediciones interiores, que resultan de la técnica de elemento finito, arrojaron una temperatura de 22.5°C ± 7.3°C, considerada de confort (figura 14) y semejante a la del análisis con termo-higrómetros.

La simulación eólica, mostrada en la figura 15, demuestra que cuando se tiene la máxima velocidad exterior, la

interior es baja, considerándose un resultado preliminar relativo a la hermeticidad de la construcción. Este resultado convendrá verificarlo posteriormente mediante análisis más minuciosos.

El aire es direccionado por los costados y por la parte superior de la casa como se muestra en el "streamline" de la figura 16.

CONCLUSIÓN

La termografía permitió observar el comportamiento térmico de los materiales y elementos con los que está realizada la vivienda. La madera y la piedra conservan bajas temperaturas, entre 12 y 16°C, mientras que la techumbre presenta índices superiores a 50°C. Se identificó también el comportamiento de otros elementos no planteados como objetos del estudio como los alerones, los que, si bien se utilizan para desalojo pluvial, cumplen también una función térmica, ya que cubren de la radiación gran parte de los muros manteniéndolos a temperatura baja que será proyectada al interior (Figura 8 y Figura 10).

Otro elemento térmico es el pórtico, que mantiene bajo de sí temperaturas menores a 20°C cuando su techumbre presenta valores sobre 50°C. Este conforma un espacio confortable dado que amortigua la radiación directa sobre la puerta, la cual, a su vez, actúa como puente térmico (Figura 9). La orientación franca O-P de la crujía combinada con el techo inclinado mantienen sin asolear la mitad del mismo, con temperaturas que rondan los 30°C, mientras que la expuesta presenta valores mayores a 50°C (Figura 10), verificando la conveniencia de utilizar esta geometría.

La aplicación de las tres técnicas de medición (inspección termográfica, mediciones termo-higrómetricas y simulación termo-eólica) permitió tener una visión más amplia del comportamiento del prototipo, concluyendo que la integralidad diseño-materiales-tapanco contribuye significativamente al confort interior. La comparativa de resultados refleja una buena concordancia entre los índices higrométricos de las técnicas, al arrojar promedios en el área habitable de 20°C de temperatura y 65% de HR.

Consideramos comprobada entonces la hipótesis planteada, en tanto que el tapanco indiscutiblemente representa el principal elemento de diseño bioclimático pasivo en el caso analizado, debido a que regula significativamente los factores higrotérmicos y, dados los índices obtenidos en este estudio, propicia condiciones idóneas para el confort humano, en coincidencia con los parámetros respectivos señalados por Olgyay (1998). De hecho, hay condiciones de confort incluso en situaciones extremas como a las que ha sido sometido el modelo en la simulación y que llegan a presentarse en el sitio. Comparativamente, las construcciones industrializadas difícilmente presentan estas condiciones confortables

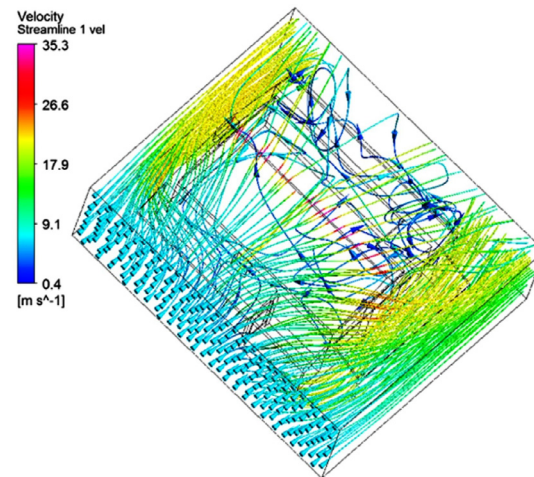


Figura 16. Streamline del viento. Fuente: Elaboración de los autores.

y saludables por el inadecuado índice térmico de los materiales, junto con un diseño que no considera el clima local ni aísla la envolvente, por lo cual se hace necesario el uso de climatización mecánica, lo que implica alta demanda energética y de emisiones de GEI (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

Por su parte, la simulación eólica permitió obtener hallazgos preliminares de hermeticidad de la crujía, lo cual se debe a un diseño aerodinámico que desvía el impacto directo del viento (Figura 16), así como por los materiales y el junteo de la piedra con arcilla. Sin embargo, consideramos que este fenómeno deberá estudiarse a mayor profundidad en investigaciones posteriores.

En conclusión, creemos que es imprescindible considerar en el diseño arquitectónico las propiedades y comportamiento de los materiales, el asoleamiento y la implementación de estrategias bioclimáticas pasivas, ya que son elementos fundamentales que influyen en las condiciones de confort higrotérmico. Asimismo, se hace necesario realizar en lo posible simulaciones higrotérmicas previas que consideren las condiciones particulares de cada proyecto. Todas las variables anteriores, al ser analizadas de manera científica, permitirán lograr la calidad ambiental interior que ejerce influencia sobre la salud, actitudes y rendimiento humanos, permitiendo comprender también los problemas del diseño espacial (Alamino & Kuchen, 2021).

El análisis del tapanco y otras estrategias bioclimáticas de la arquitectura vernácula, así como su sostenibilidad, son temas ineludibles en la investigación. Bajo planteamientos científicos, representa una base teórica muy práctica para replantear paradigmas y modelos conceptuales de la arquitectura presente y futura, la que debe ser eminentemente pasiva y coadyuvante a la EE.

Resulta impostergable el análisis profundo y científico de estas manifestaciones vernaculares que son fuente de

conocimiento arquitectónico milenario y que hoy significan una solución si no única, muy eficiente y pertinente, a la luz de los resultados obtenidos en el presente trabajo. Consideramos que este tema, con premura, debe promoverse ya como una línea de investigación sistemática y constante en la Academia, debido a la rápida extinción de muchas de estas muestras vivas de conocimiento ancestral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, P., Viñas, C., Rodríguez, A. & Varela, S. (2018). Análisis de la influencia, en la demanda de climatización, de estrategias pasivas en viviendas con grandes superficies acristaladas, mediante un código de simulación. La casa Farnsworth. *Anales de Edificación*, 4(3), 34-43 DOI: <https://doi.org/10.20868/ade.2018.3798>

Alamino Naranjo, Y. & Kuchen, E. (2021). Indicadores para evaluar el rendimiento de usuarios de oficina en clima templado cálido. *Informes de la Construcción*, 73(564), e420. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.83476>

Calderon, F. (2019). Evaluación del mejoramiento del confort térmico con la incorporación de materiales sostenibles en viviendas de autoconstrucción en Bogotá, Colombia. *Hábitat Sustentable*, 9(2), 30-41. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.03>

Ceja, F. (2012). *Evaluación de prototipos de vivienda sustentable y de bajo costo*. [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica de Querétaro (CIDETEQ)].

Fernandez, A., Garzón, B. & Elsinger, D. (2020). Incidencia de las estrategias pasivas de diseño arquitectónico en la etiqueta de eficiencia energética en Argentina. *Hábitat Sustentable*, 10(1), 56-67. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.05>

Ganem-Karlen, C. (2018). Termografía infrarroja para el diagnóstico térmico confiable con alta replicabilidad y bajo costo de viviendas en Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 8(2), 80-89. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.02.06>

Global Crisis Response Group. (2022). Global impact of war in Ukraine: Energy Crisis. Brief No. 3. Recuperado de: https://unsdg.un.org/sites/default/files/2022-08/GCRG_3rd-Brief_Aug3_2022_.pdf

Herrera Rivas, F. B. & Medina Márquez, M. G. (2018). La cultura, continuidad y transmisión. Del territorio a la vivienda vernácula. En: *DINÁMICAS URBANAS Y PERSPECTIVAS REGIONALES DE LOS ESTUDIOS CULTURALES Y DE GÉNERO*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas, México. Recuperado de: <http://ru.iiec.unam.mx/4417/1/3-101-Herrera-Medina.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Querétaro 2017*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/

[anuarios_2017/702825092108.pdf](#)

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change*. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf

Juárez, J. (2022). De la vivienda tradicional, a la vivienda popular rural en el centro occidental del estado de Puebla, México. *Revista INVI*, 37(106), 262-283. DOI: <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2022.66515>

Lárraga, R., Aguilar, M., Reyes, H. & Fortanelli, J. (2014). La sostenibilidad de la vivienda tradicional: una revisión del estado de la cuestión en el mundo. *Revista de Arquitectura*, 16(1), 126-133. DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2014.16.14>

Mandrini, M. (2022). Sustentabilidad, confort térmico y arquitectura vernácula en políticas habitacionales rurales. Caso noroeste cordobés, Argentina. *AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad]*, (32), 4-11. DOI: <https://doi.org/10.4206/aus.2022.n32-02>

Martín-Consuegra, F., Oteiza, I., Alonso, C., Cuervo-Vilches, T. & Frutos, B. (2014). Análisis y propuesta de mejoras para la eficiencia energética del edificio principal del Instituto c.c. Eduardo Torroja-CSIC. *Informes de la Construcción*, 66(536), e043. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.14.125>

Mercado, M., Barea-Paci, G., Esteves, A. & Filippín, C. (2018). Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante energy plus. *Hábitat Sustentable*, 8(1), 54-67. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.01.05>

Olgay, V. (1998). *Arquitectura y Clima. Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas*. Gustavo Gili S.A.

Rapoport, A. (2003). *Cultura, Arquitectura y Diseño*. UPC Editions.

Reus-Netto, G., Mercader-Moyano, P. & Czajkowski, J. (2019). Methodological Approach for the Development of a Simplified Residential Building Energy Estimation in Temperate Climate. *Sustainability*, 11(15), 4040. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11154040>

Rincón-Martínez, J. C., García-Gómez, C. & González-Trevizo, M. (2022). Estimación del rango de confort higrotérmico para exteriores en dos bioclimas extremos de México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23(02), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2022.23.2.014>

Suárez, R., Escandón, R., López-Pérez, R., Leon-Rodríguez, A., Klein, T. & Silvester, S. (2018). Impact of Climate Change: Environmental Assessment of Passive Solutions in a Single-Family Home in Southern Spain. *Sustainability*, 10(8), 2914. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10082914>

United Nations Environment Programme. (2021). *Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered*. Nairobi. Recuperado de: <https://www.unep.org/es/resources/emissions-gap-report-2021>